

(昭和 47 年 10 月日本造船学会秋季講演会において講演)

軟質溶接継手の静的引張強度に関する研究

正員 佐 藤 邦 彦* 正員 豊 田 政 男*

正員 藤 井 英 輔**

Tensile Behaviors and Strength of Soft Welded Joints

by Kunihiko Satoh, *Member* Masao Toyoda, *Member*
Eisuke Fujii, *Member*

Summary

In the welded joints, it becomes a common idea that the strength of weld metal is equal to or higher than it of base metal from the viewpoints of efficiency of welded joints. Otherwise, it is effective to use the weld metal whose strength is lower than it of base metal in order to prevent the initiation of weld cracking. In this report, the static tensile behaviors of the welded joints having weld metal whose strength is lower than it of base metal—so called “Soft Welded Joints”—are investigated. The “all soft welded joint” in which all weld metal are soften metal and the “partial soft welded joint” in which only a part of weld metal is soften metal were made by metal-arc welding. The main results obtained are summarized as follows:

(1) The strength of the welded joints using soft weld metal whose strength is lower than it of base metal is much elevated from it of the soft weld metal itself. It is effective to use soft weld metal in a part of weld metal from the viewpoint of efficiency of strength.

(2) The two standard strengths are considered as the required strength σ_u of welded joint, or

$$(i) \sigma_u \geq \sigma_u^B$$

$$(ii) \sigma_u \geq (\text{guaranteed strength for design}).$$

The “Soft Ratio” S_r of weld metal required to guarantee the standard strength and the elongation of welded joints are considered (Table 6). When $S_r(=\sigma_u^W/\sigma_u^B) \geq 0.93$, ultimate tensile strength and elongation of all kinds of soft welded joints become almost equal to those of base metal.

1 緒 言

溶接継手では、使用性能上の見地から、一般に溶接金属の強度を母材の強度と同等以上にすることが常識とされている。一方、溶接工作上の見地からすれば、溶接割れ感受性の高い高張力鋼の溶接や拘束の大きい厚板の溶接では、母材より強度レベルの低い溶接材料を使用すれば、割れ防止上有効であることが実験的に確かめられており¹⁾、たとえば突合せ継手の第1層目を低強度レベルの溶接棒で溶接した後、裏はつりによってこの部分を削除するといった施工法も採られている。

これまでに筆者らは溶接継手に生ずる力学的特性の不均一性に注目し、異質部とくに軟質部をふくむ材の静的引張強度に関する一連の基本的な研究を行なってきた²⁻⁶⁾。その結果によれば、母材よりも強度が低い軟質部をふくむ継手においてもその軟質部の寸法が試験片寸法（たとえば丸棒の直径や平板の板厚など）に比べて十分に小さな場合には母材と同等の強度をもちうるということが明らかにされている。

このような基本的な模型継手における結果は、前述の溶接工作上の問題のみならず、溶接棒の強度と母材の強度の matching に関する従来の考え方に対して問題を投じるものである。しかし、筆者らの上述の実験結果は、

* 大阪大学溶接工学研究所

** 船舶技術研究所

あくまで模型的な軟質部をふくむ継手での結果であり、実用の溶接継手の溶接金属に低強度レベルの材料を用いた場合の引張強度が母材と同等であることを保証するものではない。

ところで、今後、構造物がさらに大型化し、高張力鋼厚板の使用範囲が拡大するにともない、溶接工作上的見地からは、母材よりも低強度レベルの溶接材料を使用する要求も高まろう。このような見地から、本論文では溶接金属の強度が母材のそれよりも低い継手——これをここでは「軟質溶接継手」と名付ける——の静的引張における力学的挙動を明らかにしようとするものである。

実験は母材として 80 キロ高張力鋼を使用し、これを低強度レベルの溶接棒で通常の開先形状に対して手溶接した軟質突合わせ継手の引張試験を行なった。軟質溶接継手として、溶接金属すべてが軟質である全軟質溶接継手と溶接金属の一部分が軟質である部分軟質継手を作製した。それらの引張試験結果を母材および HT 80 用溶接棒で溶接した通常の溶接継手——以後簡単のために「通常溶接継手」と名付ける——の引張試験結果と比較検討ならびに解析を行なうとともに、継手の強度および延性の見地から軟質溶接継手の評価について考察を行なった。

2 実 験

実験は次に述べる 3 種類 4 系列について行なった (Table 1 参照)。

- ① 全軟質溶接継手 (Series I) : 溶接金属をすべて軟質にした継手。
- ② ルート部軟質溶接継手 (Series II, III) : 溶接ルート割れ防止の見地から、厚板突合わせ継手のルート部に低強度レベルの溶接棒を使用し、それ以外は通常の溶接棒を使用した部分軟質継手。
- ③ 軟質補修継手 (Series IV) : 補修溶接時に低強度レベルの溶接棒を使用する可能性を検討する目的で、板の表面部に軟質溶接金属を置いた部分軟質継手。

2.1 試験片の作製

実験には 3 種類の 80 キロ高張力鋼板を用いた。各系列の使用鋼板の種類と板厚および供試鋼板の化学組成は Table 2 に示す通りである。試験片は Table 1 に示すように HT 80 用、HT 60 用、HT 50 用および軟鋼用の溶接棒を用いてすべて手溶接で行なった。Series I の全試験片および Series II, III の type S では 1 つの継手についてはすべて同じ強度レベルの溶接棒を用い、Series II, III の type A, B ではルート部分の溶接にのみ軟質棒を用い、他の部分の溶接は HT 80 用溶接棒を用いた。Series IV では V 型の溝を鋼板上に切削し、その部分を軟質溶接棒を用いて補修溶接した。

開先形状は Series I では Fig.1 に示すような U 型と X 型の 2 種類とし、X 型開先はガス切断のまま、U 型開

Table 1 実験内容一覧

Series	実験対象	実験目的
I	全軟質溶接継手	(a) 軟質溶接金属の影響 (母材溶接棒強度レベル HT60, HT50) (b) 破断の影響 (type L: W=500mm, type M: W=70mm) (c) 開先形状の影響 (開先形状: U, X)
II	ルート部軟質溶接継手	(b) 破断 (溶接部) の影響 (W=392mm, t=25mm)
III	ルート部軟質溶接継手	(d) 軟質溶接棒 T ₀ の影響 (type A: T ₀ /t ₀ =1/2, type B: T ₀ /t ₀ =1/4, type S 全軟質継手, type N 通常継手)
IV	軟質補修溶接継手	(c) 軟質溶接金属の影響 (母材溶接棒強度レベル HT60, HT50, MS) (d) 軟質溶接棒 T ₀ の影響 (母材溶接棒強度レベル HT60, HT50, MS) (e) 軟質溶接棒 B ₀ の影響 (type A: B ₀ =20mm, type B: B ₀ =10mm)

Note: (1) Specimen number の説明

Series — Strength level — Groove type

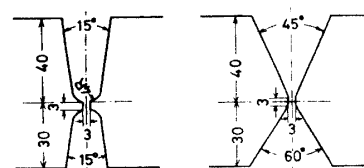
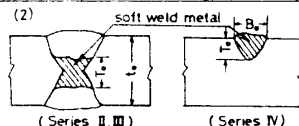


Fig.1 開先形状 (Series I)

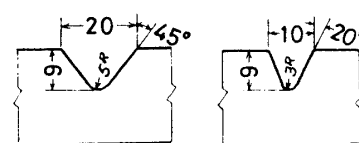


Fig.2 開先形状 (Series IV)

Table 2 供試鋼材の化学組成と板厚

Material	Series	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Thickness (mm)
HT 80 A	I	0.10	0.31	0.84	0.009	0.009	1.08	0.53	0.40	0.23	tr.	70
HT 80 B	II	0.10	0.24	0.75	0.015	0.020	0.90	0.54	0.46	0.24	0.05	25
HT 80 C	III, IV	0.13	0.30	0.71	0.011	0.003	0.97	0.51	0.40	0.25	0.047	39

Table 3 溶 接 条 件

予熱およびバス間温度	150~250°C
溶 接 電 流	160~220 Amp.
溶 接 電 圧	24~26 Volt.
溶 接 速 度	10~20 cm/min
入 熱	10~30 kJ/cm
棒 径	4 or 5 mm

Table 4 試 験 片 寸 法 (mm)

Series	type	W_0	L_0	t_0	W'	R
I	L	500	400	70	800	200
I	M	70	400	70	140	200
II	—	3~92	200	25	5~140	20~100
III, IV	—	200	400	39	390	150

先は機械加工により仕上げた。Series II, III は Fig.1 に示したものとほぼ相似的なX型開先とし、Series IV の溶接溝は Fig. 2 に示すような2種類の形状のV型溝を機械加工により仕上げた。Series II, III では溶接の際の果層法を適当に選ぶことによって軟質溶接金属の板厚方向の厚さ T_0 が母材板厚 t_0 のほぼ 1/2 になるようにした type A と 1/4 になるようにした type B の2種類の継手を作製した。また Series IV では Fig. 2 に示す形状の溝を溶接することによって板表面での軟質溶接金属の幅 B_0 がほぼ 20 mm になるようにした type A と 10 mm になるようにした type B の2種類の継手を作製した。代表的溶接条件を Table 3 に示す。

試験片の形状は Fig.3 に示すもので、Table 4 に試験片寸法の一覧表を示す。溶接による余盛は Series I では試験片 I-5 U を除いてはすべてそのままとし、I-5 U のみ余盛を削除したものとそのままのものの2種類行なった。Series II も余盛を削除したものとそのままのものと2種類行なって比較した。Series III はすべて溶接のまま、Series IV はすべて余盛を削除して試験を行なった。

Fig. 3 に示す継手引張試験片の外に、同じ溶接継手から小型の溶接金属引張試験片や断面マクロ試験片、硬さ分布測定用試験片なども採取した。

2.2 供試鋼材の機械的性質および溶接部諸寸法

Photo 1 は供試溶接継手の断面マクロ写真の代表例を示したものである。この断面マクロ写真より Fig.4 に例示するような継手各部の寸法を測定した。そして実験結果の解析のために、次式を用いて軟質溶接金属の平均幅 $(H_0)_{av}$ と平均相対厚さ $(X_t)_{av}$ を算定した。

$$\left. \begin{aligned} \text{全軟質継手: } (H_0)_{av} &= (H_B + 2H_C + H_F)/4 \\ \text{部分軟質継手: } (H_0)_{av} &= (H_{C1} + 2H_C + H_{C2})/4 \\ (X_t)_{av} &= (H_0)_{av}/t_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Fig. 5 は溶接部の硬さ分布の代表例を示したものである。

Table 5 に供試母材 (JIS 4号試験片, 1/4 t_0 中心) および溶接金属の機械的性質を示す。

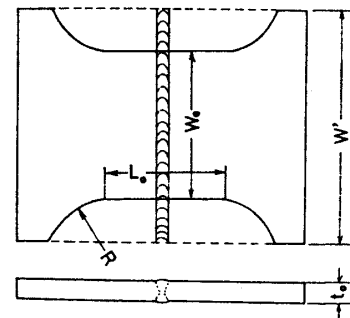
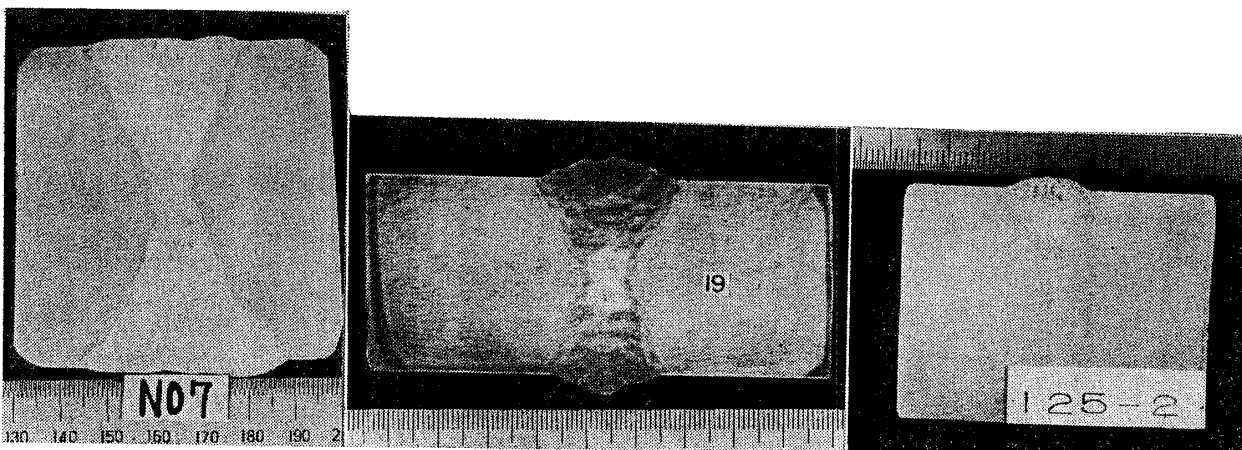


Fig. 3 試験片形状



Specimen I-5 X

Specimen III-M-B

Specimen IV-M-B

Photo 1 継手部断面マクロ写真

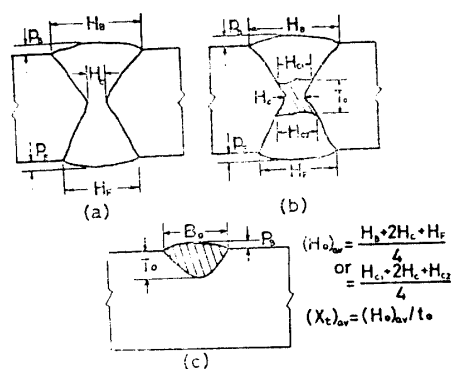


Fig. 4

2.3 引張試験

引張試験は Series I, III, IV では容量が 1,200 ton から 4,000 ton のテスト・リグで行ない、Series II では容量 200 ton アムスラ型万能試験機を用いて行なった。引張試験中は適当な標点距離間での伸びを測定して、荷重・伸び線図を各試験片について求めた。また、試験片に適当な間隔で野書線を入れたり、適当にひずみゲージやモアレ膜を貼りつけて、伸びの分布やひずみ分布を測定した。

3 強度

3.1 全軟質溶接継手の強度

Table 5 に示したように、同じ溶接棒を用いても U 開先と X 開先では溶接金属の引張強さ σ_u^W が異なる。そこで σ_u^W をベースにして実験結果を整理することにした。Fig. 6 は Series I (全軟質溶接継手) の引張強さ σ_u と溶接金属の引張強さ σ_u^W との関係を示したもので、正方形断面継手 (type M) (○, □印) および $W_0=500$ mm の広幅継手 (type L) (⊗, ⊠印) の両者を同時にプロットしてある。 $\sigma_u^W=80$ kg/mm² 上にプロットしてある実験点 (●, ■印) は HT 80 用溶接棒を用いた通常溶接継手の type L の結果である ($\sigma_u^W=80$ kg/mm² は HT 80 用の溶接金属の実際の強度でない)。

Fig. 6 のような整理をすると継手の引張強さは開先形状のいかんにかかわらず σ_u^W に対してほぼ 1 本の曲線で表われ、 σ_u^W の高いほど継手の引張強さは上昇する。また type M と type L を比較すると前報^{4,6)}でも示したように広幅継手 (type L) の強度の方が正方形断面継手 (type M) の強度よりも高くなっている。そして

Table 5 供試鋼材および溶接金属の機械的性質

Base metal

鋼 種	引張強さ (kg/mm ²)	降伏強さ (kg/mm ²)	伸び率 (%)	絞り (%)
HT 80 A	82.1	75.4	25.4	69.2
HT 80 B	83.5	79.2	25.0	70.0
HT 80 C	90.1	83.0	24.5	70.0

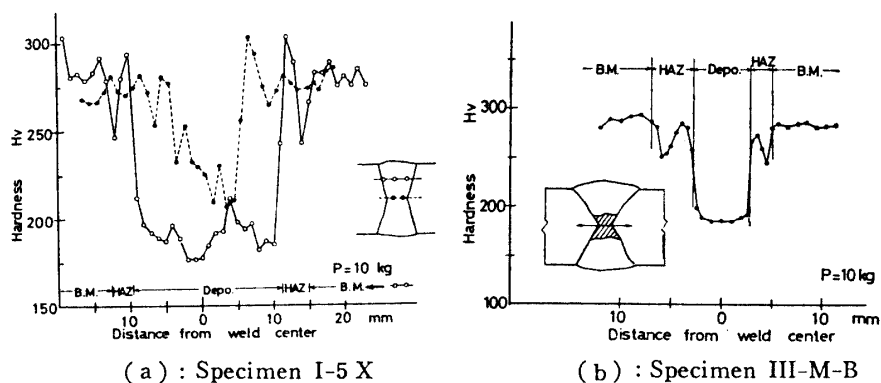
(JIS 4 号)

Weld metal

Series	Specimen No.	H* or S*	引張強さ (kg/mm ²)	降伏強さ (kg/mm ²)	伸び率 (%)	絞り (%)
I	I-6U	S	67.8	—	24.5	67.5
	I-6X	S	65.1	—	25.0	70.6
	I-5U	S	59.6	51.4	—	75.2
	I-5X	S	54.0	47.8	—	79.8
II	II-5	S	62.7	51.7	—	74.5
		H	87.0	78.2	24.8	66.7
III	III-6	S	74.8	67.1	(12.2)	73.0
		H	88.3	83.7	(14.9)	71.0
	III-5	S	60.1	51.0	—	75.0
		H	83.1	75.0	(20.8)	61.7
	III-M	S	49.9	40.8	(22.9)	67.1
		H	83.1	75.0	(20.8)	61.7
IV	III-N	S	88.3	83.7	(14.9)	71.0
		H	88.3	83.7	(14.9)	71.0
	N-6	S	74.6	67.4	11.9	71.8
	N-5	S	62.5	50.3	12.2	75.5
	N-M	S	50.5	41.0	13.8	75.3

* H : HT 80 welding rod

S : Soft welding rod



(a) : Specimen I-5 X

(b) : Specimen III-M-B

Fig. 5 溶接部の硬さ分布

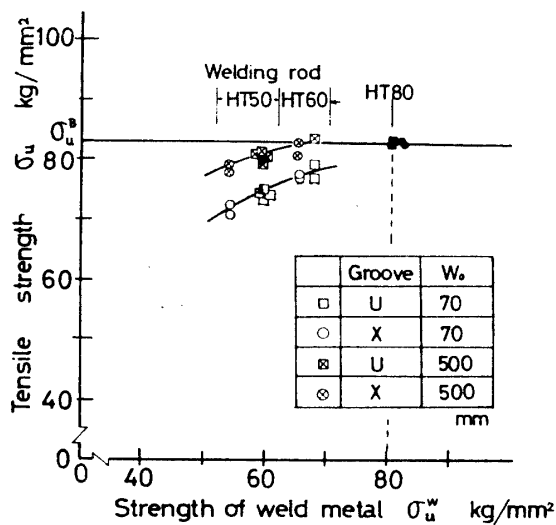


Fig. 6 継手の引張強さ σ_u におよぼす溶接金属の引張強さ σ_u^W の影響 (全軟質溶接継手)

σ_u^B : 母材の引張強さ

Fig. 7 は Series I の降伏強さ σ_Y (0.2% 耐力, 標点距離 $L_0=400$ mm) と溶接金属の引張強さ σ_u^W との関係をプロットしたものである。溶接金属の軟質度合, 開先形状, 試験片幅などの影響についての傾向は引張強さの実験結果 (Fig. 6) と全く同じである。特に広幅継手 (type L) の σ_Y はいずれも母材の降伏強さ σ_Y^B とほとんど等しくなっている。

Fig. 7 に示した降伏強さ (0.2% 耐力) は引張試験における荷重・ひずみ (標点距離 $L_0=400$ mm 間での公称ひずみ) 曲線から求めたものである。したがって溶接継手とくに軟質溶接継手のように引張方向に伸びが不均一分布するような場合には降伏強さは基準となる標点距離 L_0 の大きさの影響を受け, L_0 が長くなるほど降伏強さは高くなるはずである。すなわち, L_0 を十分に大きくとれば継手の伸び特性は L_0 間の大部分を占める母材の伸び特性によってほぼ決定されることになり, 継手の応力・ひずみ曲線は母材と全く同じとなる。したがって継手の引張強さ σ_u が母材の降伏強さ σ_Y^B よりも大きい場合には継手の降伏強さはすべて $\sigma_Y=\sigma_Y^B$ となるはずである。Fig. 7 において広幅継手の σ_Y が溶接継手の引張強さ σ_u^W のいかににかかわらずほぼ一定となっているのはこのような理由によるものであろう。

3.2 部分軟質溶接継手の強度

3.2.1 強度におよぼす軟質度と軟質部寸法の影響

Fig. 8 の白抜きの実験点は Series III (ルート部分軟質溶接継手) における type S (全軟質継手 $T_0=t_0$), type A ($T_0=1/2 t_0$), type B ($T_0=1/4 t_0$) の引張強さ σ_u と軟質溶接金属の引張強さ σ_u^W の関係をプロットしたものである。図中の ⊗ 印は type N (通常溶接継手) の結果を同時にプロットしたものである。部分軟質継手の引張強さは同じ溶接棒を用いた全軟質継手の引張強さよりは当然高く, また T_0 が小さくなるほど引張強さは上昇している。そして HT 60 用溶接棒を用いた継手では, いずれの type のものも通常溶接継手の引張強さとほとんど等しくなっている。また軟質溶接金属の引張強さ σ_u^W が低下するにつれて継手の引張強さは低下するが, 部分軟質継手では全軟質継手に比べてその低下の割合が小さい。

Fig. 8 の黒く塗りつぶした実験点は Series IV (軟質

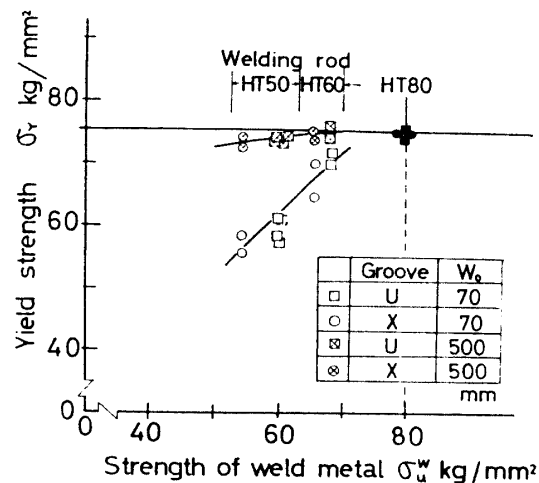


Fig. 7 継手の降伏強さ σ_Y におよぼす溶接金属の引張強さ σ_u^W の影響 (全軟質溶接継手)

HT 60 用溶接棒を用いた広幅継手では通常溶接継手と全く同等の強度を有していることがわかる。

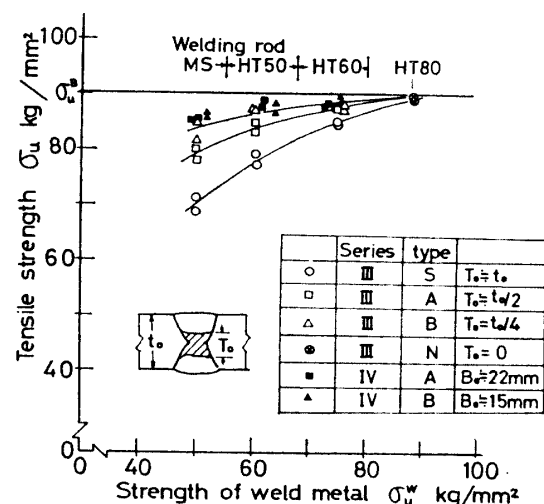


Fig. 8 継手の引張強さ σ_u におよぼす溶接金属の引張強さ σ_u^W の影響 (部分軟質溶接継手)

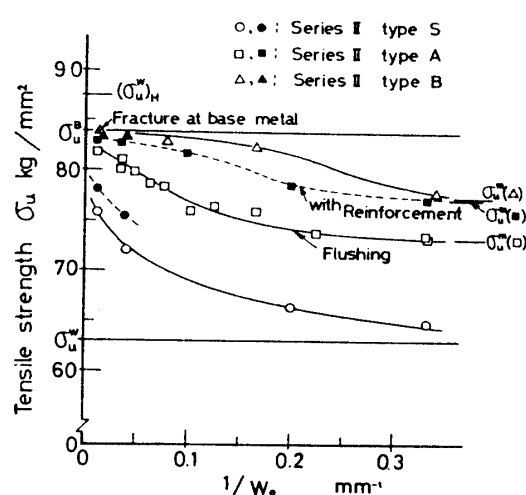


Fig. 9 継手の引張強さ σ_u におよぼす板幅 W_0 の影響 (Series II)

手である type S (○印) の結果もプロットしてある。図中の黒く塗りつぶした実験点は余盛をもつもの、白抜きの実験点は余盛を削除したものである。溶接長 W_0 の小さい継手の引張強さは type S の全軟質継手では軟質溶接金属自体の強度 σ_u^w に等しく、部分軟質継手では軟質溶接金属の強度 σ_u^w と通常溶接金属の強度 $(\sigma_u^w)_H$ を面積比に按分して求めた強度 σ_u^m (□, △など) に等しくなる⁵⁾。いずれの系列においても溶接長 W_0 が大きくなるにつれて継手の強度はこの σ_u^m の値よりも上昇し、ある一定値に漸近してゆく傾向を示す。type B ($T_0=4$ mm) の $W_0=92$ mm の継手では2本の試験片のうち△印で示す1本は完全に母材で破断し、他の1本も破面が一部母材を通過しており、もちろん継手の強度は σ_u^B と等しい。余盛の有無の影響は前報⁶⁾で述べた実験結果と同じ結果が得られており、余盛のある継手は削除した継手に比べて強度が高い。

4 軟質溶接継手の強度に関する理論解析との比較

4.1 相対厚さと強度

筆者らが行ってきた軟質部をふくむ継手の静的強度に関する研究^{2,3,4,6)}によると、その強度は軟質部の試験片寸法に対する相対的な厚さによって定まり、引張強さと相対厚さの関係は理論的に求めることができる。

軟質部をふくむ丸棒継手の場合、軟質部厚さ H_0 と試験片直径 D_0 の比、すなわち相対厚さ $X (=H_0/D_0)$ が定まれば、継手の公称応力 σ_z と公称ひずみ ϵ_z の関係は母材を剛体と仮想すると前報^{2,6)}に示したように次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{1}{3} \sqrt{(1-\epsilon) \left\{ \frac{\epsilon}{2Y} - 1 + \epsilon \right\} \{ 2\epsilon + \epsilon^2 - 4(1-\epsilon)^2 Y \}} \\ \sigma_z &= \sigma_u^w \left(\frac{e}{n} \right)^n \frac{\{ \ln(1+\epsilon_z) \}^n (1+Y)}{(1+\epsilon_z)} \\ \epsilon &= \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon_z}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

軟質部をふくむ平板継手で板幅 W_0 が板厚 t_0 に比べて十分に大きな場合には、相対厚さ $X_t (= \text{軟質部厚さ}/\text{板厚})$ が定まると、 σ_z と ϵ_z の関係は前報⁴⁾に示したように次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} X_t &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(1-\epsilon) \left\{ \frac{\epsilon}{2Y} - 3(1-\epsilon) \right\} \left\{ \frac{2\epsilon+1}{3} - \frac{(1-\epsilon)^2 Y_t}{2\epsilon} \right\}} \\ \sigma_z &= \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \sigma_u^w \left(\frac{e}{n} \right)^n \frac{\{ \ln(1+\epsilon_z) \}^n (1+Y_t)}{(1+\epsilon_z)} \\ \epsilon &= \frac{1}{1+\epsilon_z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

母材が塑性変形するような小さな相対厚さの範囲では前報⁶⁾で示したように次式で求められる等価相対厚さ X_{eq} を導入する。

補修継手の type A ($B_0=22$ mm) および type B ($B_0=15$ mm) の引張強さ σ_u と軟質溶接金属の引張強さ σ_u^w の関係をプロットしたものである。この実験では軟質溶接金属の厚さ T_0 はほぼ $1/4 t_0$ と一定であるので、実験を行なった σ_u^w の範囲では Series III (ルート部分軟質継手) の type B ($T_0=1/4 t_0$) の引張強さとほとんど等しく、軟質部表面での幅 B_0 の影響は実験の B_0 の範囲内ではほとんどみられない。

紙数の都合で省略するが、Series III, IV の降伏強さ σ_Y (0.2% 耐力, $L_0=400$ mm) も引張強さと全く同じ傾向を示すことが確かめられた。

3.2.2 強度におよぼす板幅 (溶接長) の影響

Fig. 9 は Series II における type A (□印) および type B (△印) の引張強さ σ_u を試験片の溶接長の逆数 $1/W_0$ に対してプロットしたものである。同時に全軟質継

$$\left. \begin{aligned} X_{eq.} &= 0.5 X(\text{or } X_t) + X_{eq.}^B & (X \leq X_{eq.}) \\ X_{eq.} &= X(\text{or } X_t) & (X > 0.5 X + X_{eq.}^B) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで $X_{eq.}^B$ は母材の引張強さ σ_u^B に対応する等価相対厚さである。継手の引張強さは (4) 式の $X_{eq.}$ に対する引張強さを (2), (3) 式で $X = X_{eq.}$ として求めればよい。Fig. 10 は Series I の正方形断面継手 (type M) の引張強さ σ_u と軟質溶接金属の引張強さ σ_u^W との比 σ_u/σ_u^W を平均相対厚さ $(X_t)_{av}$ に対してプロットしたものである。前報⁶⁾によると正方形断面継手の強度は同じ相対厚さをもつ丸棒継手の強度と等しい。図中の曲線①は (2) 式から求められる母材を剛体と仮想した理論曲線であり、曲線②～⑤は (4) 式を用いて計算した強度計算曲線である。実用の継手では X 開先などで溶接を行なうので、板厚方向に軟質部厚さの不均一があるが、相対厚さとして平均相対厚さ $(X_t)_{av}$ を用いて計算した理論曲線と実験の結果とはよい一致を示している。したがって正方形断面の軟質溶接継手の強度は、母材の引張強さ σ_u^B と軟質溶接金属の引張強さ σ_u^W および平均相対厚さ $(X_t)_{av}$ が決まると著者らの提案した計算式を用いてほぼ評価することができる。

4.2 板幅の影響

軟質部をふくむ平板継手において、正方形断面継手から板幅が増加するにつれて継手の引張強さは上昇し、ある一定値に漸近する。前報⁶⁾に示したように板幅 W_0 がある一定値 W_∞ よりも大きくなると、無限大板幅の場合の強度を示し、 $W_\infty \doteq 5t_0$ で与えられる。無限大板幅の場合の継手の強度 $(\sigma_u)_\infty$ と正方形断面継手の強度 $(\sigma_u)_\square$ の比 $(\sigma_u)_\infty/(\sigma_u)_\square$ を f -値と定義する。この f -値がわかれば、正方形断面の軟質溶接継手から、無限大板幅の強度が求められる。

f -値は (2), (3) および (4) 式を用いて求めることができ、相対厚さ X_t および母材と軟質材の強度比 $\kappa (= \sigma_u^B/\sigma_u^W)$ の関数となる。Fig. 11 の実線はそうにして求めた f -値 ($n_1=0.15$) と相対厚さ X_t の関係をいろいろな κ -値に対して示したものである。この関係を工学的見地から Fig. 11 の点線で示すように評価すると $1.2 \leq \kappa \leq 2.2$ の範囲内の κ に対して近似的に次式で表わされる。

$$f(X_t, \kappa) = \begin{cases} 0.8(\kappa-1)X_t + 1.0 & X_t \geq (X_t)_D \\ \frac{0.1}{X_t} + 1.1 & X_t < (X_t)_D \end{cases} \quad (5)$$

ここで $(X_t)_D$ は

$$0.1/(X_t)_D - 0.8(\kappa-1)(X_t)_D = 0.1$$

で与えられる。

本実験の Series I の type L は $W_0 \doteq 7.1t_0$ 、Series III の type S は $W_0 \doteq 5.1t_0$ であり、ほぼ無限大板幅の場合の強度を示していると考えられる⁶⁾。Figs. 13, 14 に示すように正方形断面継手の強度と (5) 式の f -値を用いて求めた強度は実験値とよく一致しており、十分に大きな板幅をもつ継手の強度は、正方形断面継手の引張強さと (5) 式の f -値とから推定できる。

4.3 部分軟質溶接継手の強度

板幅 W_0 が十分に大きい部分軟質継手の強度について考える。 W_0 が十分に小さい場合、前述のように σ_u^W と $(\sigma_u^W)_H$ を断面積比で按分して強度を推定することができる。 W_0 が十分に大きな場合にも相対厚さ $(X_t)_{av} = (H_0)_{av}/$

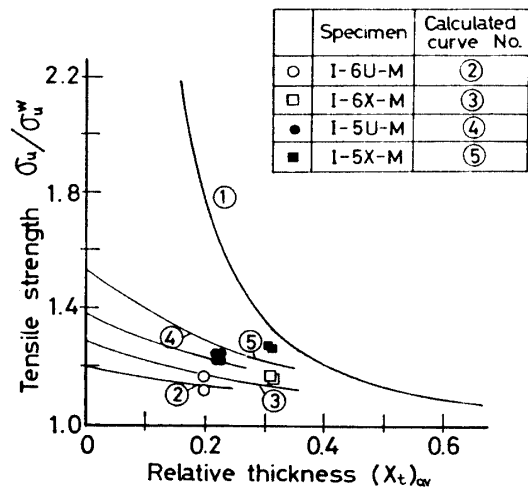


Fig. 10 軟質溶接継手の引張強さに関する理論解析と実験値との比較(全軟質継手, 正方形断面)

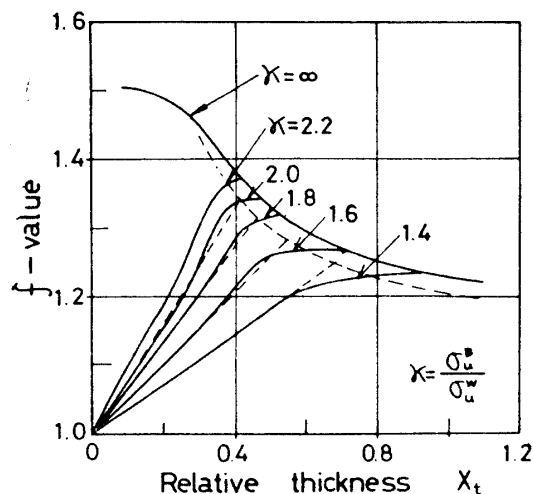


Fig. 11 f -値と相対厚さ X_t の関係 ($n_1=0.15$)

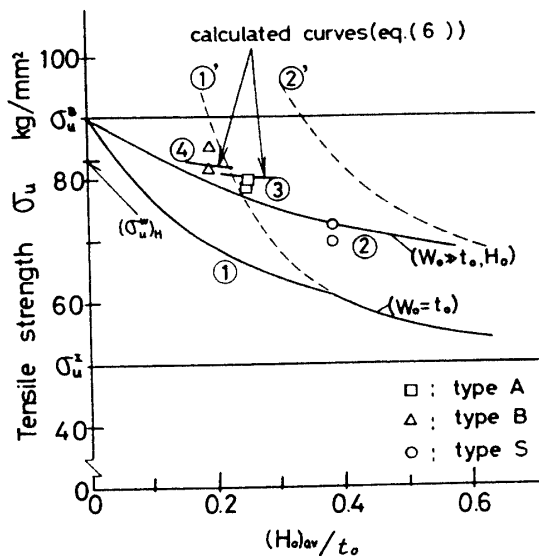


Fig. 12 部分軟質溶接継手の引張強さに関する理論解析と実験値の比較

t_0 を有する W_0 が十分に大きな全軟質継手の引張強さ $(\sigma_u)_J$ と $(\sigma_u^W)_H$ を同じように、面積比に按分することによって継手の強度 σ_u が次式で求められると考える。

$$\sigma_u = (\sigma_u)_J \times \frac{T_0}{t_0} + (\sigma_u^W)_H \times \left(1 - \frac{T_0}{t_0} + \frac{2p}{t_0}\right) \quad (6)$$

ここで p は余盛高さを表わす。 $(X_t)_{av}$ が定まれば、前項のようにして解析的に $(\sigma_u)_J$ が求められるので、(6) 式を用いて継手の強度が求められる。Fig. 12 は Series III-M の type A, B の各場合の引張強さと $(H_0)_{av}/t_0$ の関係をプロットしたものである。曲線②は (3), (4) 式より求めた広幅全軟質継手の計算曲線で、○印の type S はほぼこの曲線②と等しい値を示している。曲線③, ④は type A (□印), type B (△印) に対応する強度を (6) 式から求めたもので、実験値とはほぼ一致しており、(6) 式を用いて部分軟質継手の強度がほぼ推定できることがわかる。

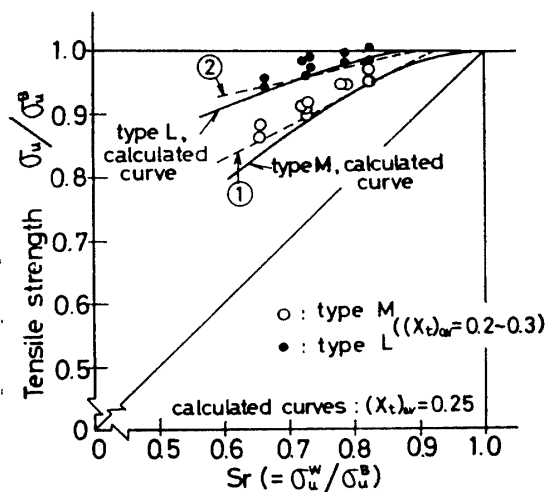


Fig. 13 継手の引張強さにおよぼす軟質度 S_r の影響 (全軟質継手)

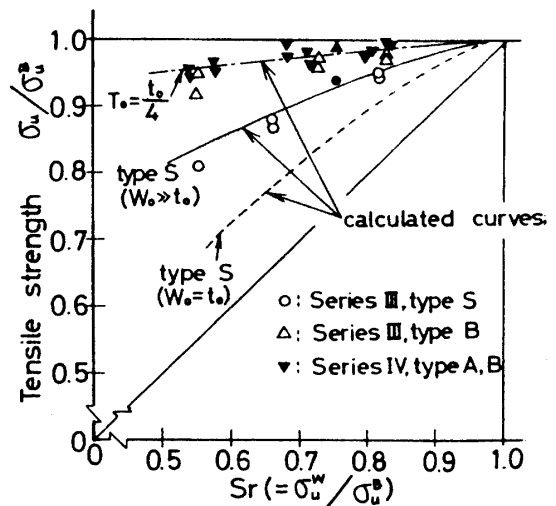


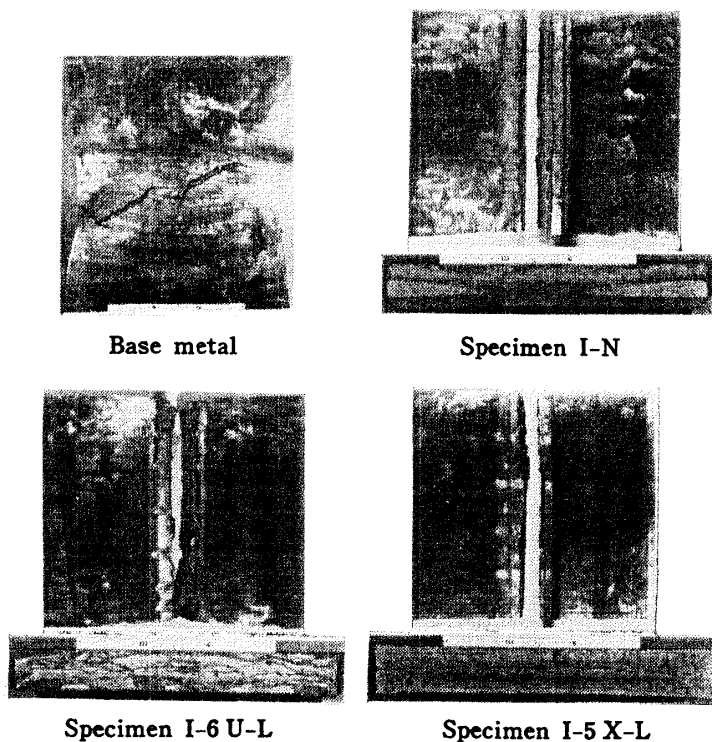
Fig. 14 継手の引張強さにおよぼす軟質度 S_r の影響 (部分軟質継手)

4.4 軟質度の影響

軟質溶接継手の溶接金属の引張強さ σ_u^W と母材の引張強さ σ_u^B との比 σ_u^W/σ_u^B を溶接金属の“軟質度”と定義し、 S_r の記号で表わす。これまでの考察をもとに、軟質溶接継手の引張強さ σ_u と σ_u^B の比 σ_u/σ_u^B と S_r の関係を求めることができる。Fig. 13 および Fig. 14 は Series I および Series III, IV ($T_0 \approx 1/4 t_0$) の σ_u/σ_u^B を S_r に対してプロットしたものである。図中に示す曲線は筆者らの理論的考察からそれぞれの場合に対応する関係を計算によって求めたものである。いずれの計算曲線もほぼ実験値と一致する傾向を示しており計算によって軟質溶接継手の強度の推定が可能である。また実験は母材が HT 80 の場合についてのみであるが、前報⁶⁾での基礎的な実験結果から考えて、この関係は母材の強度が変わっても成り立つものと考えられる。

5 破壊様式

Photo 2 は Series I の試験片の破断外観および破面写真である。母材試験片は oblique neck を起こして斜めに破断しているが、通常溶接継手は巨視的にも引張軸と垂直な方向で溶接ボンド部から母材にかけて破断している。軟質継手はすべて溶接部 (ボンド部を含む) で破断しており、HT 60 用の継手では通常溶接継手と同じように破断部で横方向の収縮変形を示しているが HT 50 用の継手では収縮変形をほとんど呈さずに破断にいた



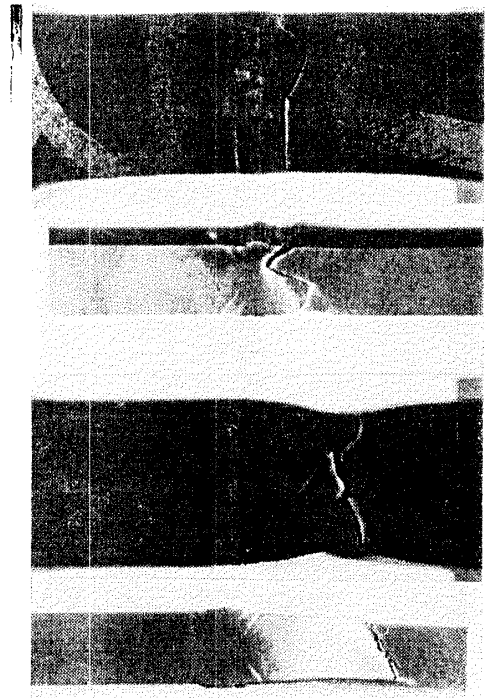
Base metal

Specimen I-N

Specimen I-6 U-L

Specimen I-5 X-L

Photo 2 破断外観 (Series I, 広幅継手)

Photo 3 破断外観 (Series II, $W_0=92$ mm, 部分軟質継手 type B)

っている。Photo 2 の破面写真をみると、溶接継手では破面の一部に脆性破面がみられる。とくに軟質溶接継手では、溶接金属の強度が低いものほど脆性破面の占める割合が大きくなる。Fig. 15 は Series I の type L での脆性破面率と溶接金属の強度 σ_w^w との関係を示したものであり、HT 50 用の継手ではほぼ 100% 脆性破面を呈しているが HT 60 用の継手では脆性破面率は小さく通常溶接継手とほとんど変わらない。

Photo 3 は Series II の $W_0=92$ mm の場合の type B の破断外観と側面写真である。部分軟質継手でも、type B のように T_0 が小さくなると母材で破断することもある。Series III では通常継手もふくめてすべて溶接部から破壊が発生している。Series IV も一般には溶接部で破断しているが、HT 60 用の溶接棒を用いた継手では表面の軟質溶接止端の軟化域から発生し、母材側で破断しているものもみられた。

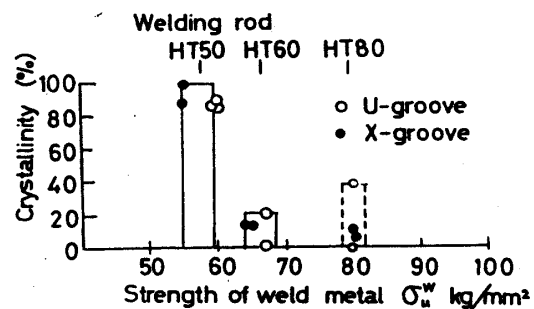


Fig. 15 全軟質継手の脆性破面率におよぼす溶接金属の引張強さの影響

6 延 性

軟質部をふくむ継手では一般に強度は軟質部自体の強度より上昇するが、延性は低下する。これは切欠をもつ材において延性破壊の場合強度 (net stress) は上昇するが、延性が低下するのと同現象である。前報^{2,3,6)}で実験を行なった丸棒継手の絞りのように継手の延性を軟質部に限ってみた場合にはそれは特に著しい傾向を示す。

ところで、引張試験片の伸び率を任意の標点距離 L_0 を基準にして考えるとき、その伸び率は L_0 の大きさの影響を受ける。引張試験片の破断後の伸びは局部伸びと一様伸びの和として与えられる。伸び率で考えるとき一様伸びは標点距離 L_0 には関係しないが局部伸びの項が L_0 の大きさの影響を受けるため、伸び率が L_0 の大きさに依存してくる。したがって溶接継手とくに軟質溶接継手などの伸び特性を母材と比較して考える場合にはその評価の基準となる標点距離 L_0 の値が問題となる。一般に、溶接継手をふくむ構造部材は継手部の寸法に比べて十分に大きい。標点距離 L_0 を十分に大きくすると伸び率は局部伸びの項が無視できるようになり一様伸びと等しくなる。この点をも考えて溶接継手の延性を一様伸びの大きさに評価すると標点距離の大きさの問題は除くことができる。

本項では以上の点を考慮し、軟質溶接継手の破断後の伸び率および伸びの分布から一様伸びを求めて、母材や通常溶接継手との比較を行なう。

6.1 破断後の伸び率

Fig.16 は Series I の全軟質継手における破断後測定した伸び率 ϵ_F ($L_0=400$ mm) と軟質溶接金属の引張強さ σ_u^w の関係を示したものである。 $\sigma_u^w=80$ kg/mm² 上の実験点は通常溶接継手の結果であり、図中の+印および○印はそれぞれ $W_0=500$ mm および $W_0=70$ mm の母材の伸び率である。3項で示したように、軟質溶接継手の強度は母材とほとんど等しくなっているが、伸び率は母材に比べてかなり低下している。

Fig.17 の黒く塗りつぶした点は Series III の伸び率 ϵ_F ($L_0=400$ mm) と軟質部厚さ T_0 (mm) との関係を示したものである。60 キロ軟質溶接棒を用いた継手は 50 キロ軟質棒を用いた継手よりも ϵ_F は大きく、 T_0 が小さくなるほど ϵ_F は大きくなる。 $T_0=0$ 上の実験点は通常溶接継手 (Series III-N), ×印は母材素材の引張試験における伸び率 ϵ_F であり、この場合も母材や通常継手に比べてかなり小さな値となっている。Fig.17 の白抜きの実験点は最大荷重時における伸び率 ϵ_M ($L_0=400$ mm) を示したものである。

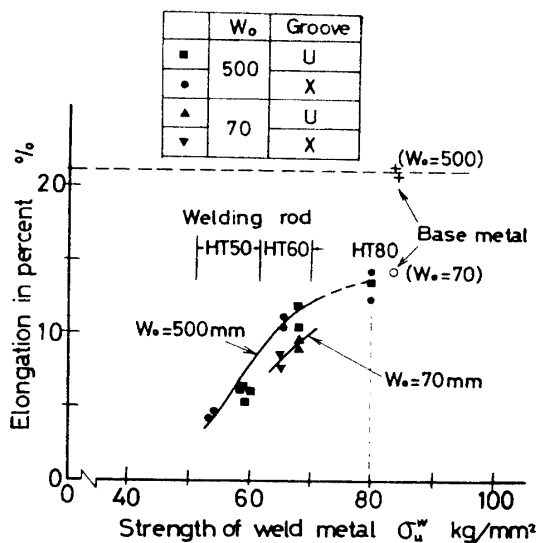


Fig. 16 破断時の伸び率 ($G. L. = 400$ mm) におよぼす溶接金属の引張強さの影響 (全軟質継手)

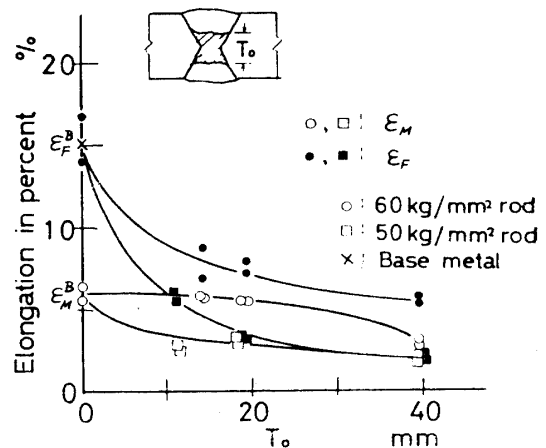


Fig. 17 伸び率 ($G. L. = 400$ mm) と T_0 の関係 (部分軟質継手). ϵ_F : 破断時の伸び率, ϵ_M : 最大荷重時の伸び率

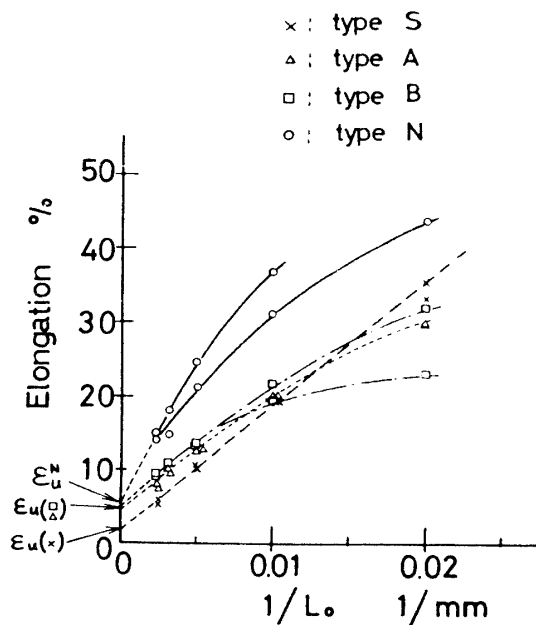


Fig. 18 伸び率と標点距離の逆数 $1/L_0$ の関係

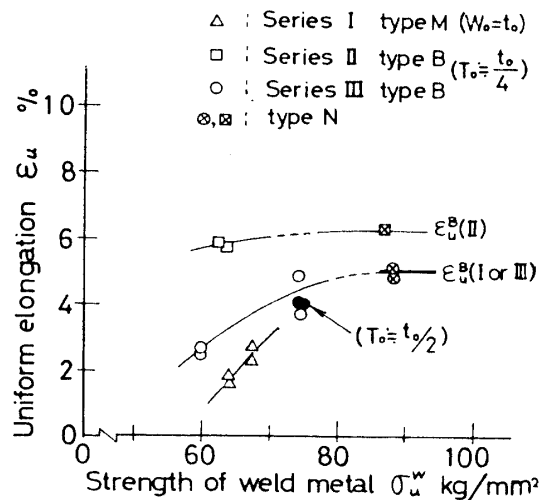


Fig. 19 継手の一様伸びにおよぼす溶接金属の引張強さの影響

6.2 一様伸び ϵ_u

引張試験で破断後の標点距離 L_0 間の伸びを e 、一様伸びを ϵ_u 、局部伸びを $\beta(L_0)$ とすると、伸び率 δ (標点距離 L_0) は

$$\delta = e/L_0 = \epsilon_u + \beta(L_0)/L_0 \quad (7)$$

となる。 L_0 がある程度以上に大きくなり、局部伸びの部分ですべてふくむようになると $\beta(L_0)$ は一定値となり、 δ と $1/L_0$ とは直線関係にあることになる。Fig. 18 は Series III の HT 60 用の溶接棒を使用した継手の L_0 間の伸び率 δ と $1/L_0$ の関係をプロットしたものである。 $1/L_0$ の小さな範囲では δ と $1/L_0$ が直線関係にあり、部分軟質継手では通常継手の一様伸び $\epsilon_u^N (\equiv \epsilon_u^B)$ とほとんど等しくなっている。

伸び率 δ (G. L. = L_0 mm) と $1/L_0$ の関係がほぼ直線関係にある場合には G. L. = $(L_0)_1$ のときの伸び率を δ_1 、G. L. = $(L_0)_2$ のときの伸び率を δ_2 とするとき、一様伸び ϵ_u は次式から求められる。

$$\epsilon_u = \{(L_0)_2 \delta_2 - (L_0)_1 \delta_1\} / \{(L_0)_2 - (L_0)_1\} \quad (8)$$

Fig. 19 は (8) 式より計算した一様伸び ϵ_u を軟質溶接金属の強度 σ_u^W に対してプロットしたものである。HT 60 用の溶接棒を用いた部分軟質継手では母材の一様伸び ϵ_u^B とほぼ等しい一様伸びを示している。HT 50 用の溶接棒を用いた部分軟質継手でも、Series II の type B のように、 ϵ_u^B とほとんど等しい伸びを示すこともある。全軟質継手は全般的に一様伸びが小さい。

7 軟質溶接継手の評価

一般に溶接継手では溶接金属および熱影響部の局部的な組織と力学的特性が母材のそれと異なるため、溶接継手としての強度・延性などの力学的諸特性は適用される溶接法および母材と溶接材料の組合わせによって異なるはずである。この場合、継手としてのこれらの力学的諸特性の要求値は構造および継手設計の基本思想によって異なるであろう。ここではこのような基本思想には立ち入らないで、これまでに得られた軟質溶接継手の静的引張試験による強度・延性を母材および通常溶接継手と比較することにより総合的考察を行なう。

7.1 軟質溶接継手の引張強度

溶接継手の引張強度を評価する際の基準としてここでは次に示すような2つの基準を考えることにする。

(I) 母材の強度に等しい継手の強度を保証する。

(II) 設計の基準となる母材の強度 (例えば HT 80 材の場合には 80 kg/mm^2) を保証する。

軟質溶接継手の引張強さ σ_u は Figs. 13, 14 に示したように計算によって求めることができるが、ここでは工学的見地から Fig. 13 の点線①, ②に例示するようにそれぞれの Series における実験点の最低値を通る直線で評価することにする。Fig. 20 はそれらの引張強さの最低値を示す直線を1つに合わせたものである。いずれの直線も溶接金属の軟質度 S_r が1に近づくにつれて上昇する。また直線の傾きは、全軟質継手では正方形断面継手 (曲線①) よりは広幅継手 (曲線②) の方が、また全軟質継手 (曲線③) よりは部分軟質継手 (曲線④) の方が小さくなっている。

次に前述の2つの評価基準の強度を保証する溶接金属の軟質度 S_r について考える。まず基準 (I) の母材の強度と等しい強度を保証する S_r を求める。Fig. 20 では、曲線①～④はすべて $S_r = 0.9 \sim 0.93$ の間で $\sigma_u/\sigma_u^B = 1.0$ になっている。母材と同等の強度を保証する軟質度 S_r^B は 0.93 であると考えられ、すなわち全軟質継手、部分軟質継手を問わず溶接金属の強度が母材の強度の 93% 以上あれば軟質溶接継手の強度は母材と同等になる。

次に基準 (II) について考える。通常母材の強度 σ_u^B は設計の基準となる強度 σ_u^D よりも高いのが普通である。基準 (II) の母材の設計強度 σ_u^D を保証する軟質度 S_r^D は σ_u^B/σ_u^D の関数となる。全軟質溶接継手の強度を Fig. 20 の曲線①、部分軟質溶接継手 ($T_0 \equiv 1/4 t_0$) の強度を Fig. 20 の曲線④で評価すると S_r^D と σ_u^B/σ_u^D の関係が求められ、

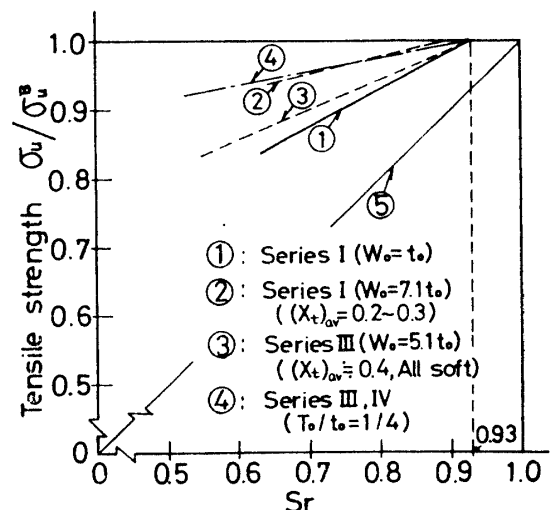


Fig. 20 引張強さにおよぼす軟質度の影響

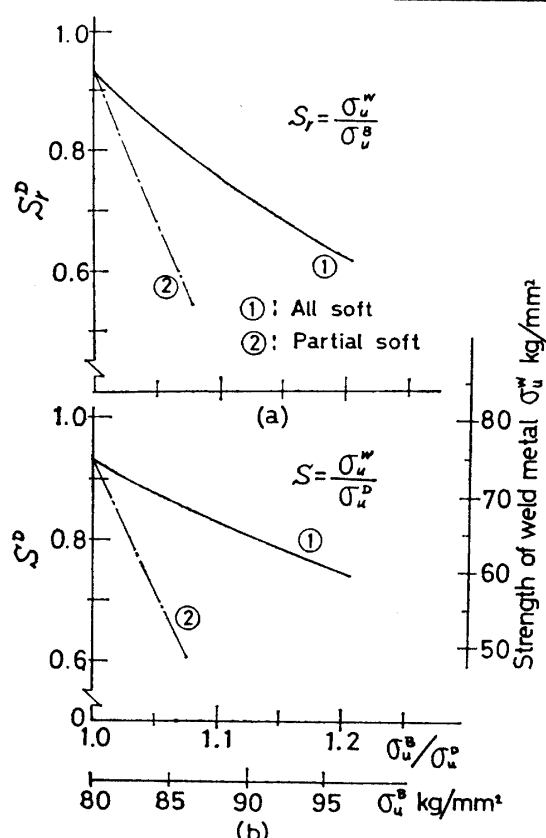


Fig. 21 母材の設計の基準となる強度を保証する軟質度 S_r, S^D と母材の強度の関係

これも設計の基本思想によって大いに異なるものと思われる。ここでは母材の ϵ_u^B を基準にし $\epsilon_u \geq 0.8 \epsilon_u^B$ を1つの評価基準と考える。そうすれば7.1のそれぞれの基準強度を保証する軟質度 S_r の場合の $\epsilon_u \geq 0.8 \epsilon_u^B$ を

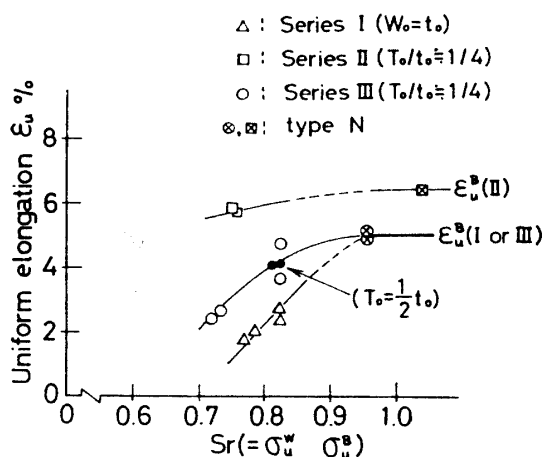


Fig. 22 継手の一樣伸びにおよぼす軟質度 S_r の影響

Fig. 21(a) のようになる。 σ_u^D を保証するための溶接金属の強度 σ_u^w と σ_u^D の比を S^D で表わし、この S^D と σ_u^B / σ_u^D の関係を示したものが、Fig. 21 (b) である。Fig. 21 (b) の縦軸 σ_u^w 、横軸 σ_u^B の絶対値目盛は参考として $\sigma_u^D = 80 \text{ kg/mm}^2$ の場合について一例として示したものである。

いま母材の引張強さ $\sigma_u^B = 82 \text{ kg/mm}^2$ の場合について以上の結果をまとめると Table 6 に示すようになる。

7.2 軟質溶接継手の伸び

軟質部をふくむ継手の延性は一般に母材に比べて低下する傾向にあることはこれまでに述べた通りである。ところで延性を伸びで評価する場合標点距離の問題などがあることを指摘し、その問題を除外できる評価の方法の1つとして一樣伸び ϵ_u で評価することを述べた。

そこで (8) 式によって求めた一樣伸び ϵ_u の値をもとにして7.1で述べた基準強度を保証する軟質度の各場合の伸びを母材との比較の上で検討する Fig. 22 は (8) 式から求めた ϵ_u を溶接金属の軟質度 S_r に対してプロットしたものである。図中の⊗, ⊕印は通常溶接継手の場合の ϵ_u を示したもので母材の ϵ_u^B と考えてよい。 ϵ_u の絶対値は供試母材すなわち ϵ_u^B の絶対値や母材のひずみ硬化指数に大きく依存するものであり、継手として必要とされる一樣伸び ϵ_u の値を定めることは困難であり、

Table 6 軟質溶接継手の評価

基準	基準 (I)		基準 (II)	
基準の内容	母材の強度と同等 ($\sigma_u = \sigma_u^B$)		母材の設計の基準となる強度 ($\sigma_u = 80 \text{ kg/mm}^2$)	
	S_r	一樣伸び	S_r^*	一樣伸び
全軟質継手	0.93	○	0.88	△**
部分軟質継手 ($T_0 = 1/4 t_0$)	0.93	○	0.80	○

* $\sigma_u^B = 82 \text{ kg/mm}^2$

** 外挿結果ではほぼ満足しているもの

8 結 論

低強度溶接材料を用いて溶接した軟質溶接継手を作製し、その静的引張試験を行なった。軟質溶接継手としては溶接金属のすべてが軟質である全軟質継手とルート部や余盛止端部など溶接金属の一部が軟質である部分軟質継手の2つの type を考えた。それらの試験結果と母材や通常溶接継手と比較考察し、次のような結論が得られた。

(1) 溶接金属として母材よりも低強度の材料を用いても、溶接継手の強度は溶接金属の強度よりも大きく上昇する。溶接金属の一部のみを低強度材料で溶接する部分軟質継手では全軟質溶接継手よりも強度の上昇が大きい。

い。軟質溶接継手の強度は溶接金属の軟質度 $S_T(=\sigma_u^W/\sigma_u^B)$, 軟質部の寸法 ($(X_t)_{av}$, T_0/t_0 など) や板幅などの影響を受ける。

(2) 軟質溶接継手の延性は一般に母材に比べて低下するが継手の強度が上昇するにつれて母材の延性に近づく。

(3) 溶接継手の評価に際して継手の強度がもつべき基準強度として2つの基準を考え, それぞれの基準強度を保証するに必要な溶接金属の軟質度 S_T とその場合の継手の伸び特性について考察を行なった (Table 6)。 $S_T \geq 0.93$ の場合にはいずれの軟質溶接継手であっても強度および一様伸びともに母材と同等となる。

(4) 軟質溶接継手の引張強度は板幅 W_0 (溶接長) の影響を受け, W_0 が大きくなるほど継手の強度は上昇してある一定値に近づく。十分に大きな板幅の全軟質継手の継手強度は正方形断面をもつ継手の強度から著者らの提案した f -value を用いて推定できる。

(5) 軟質溶接継手では, 溶接金属の軟質度 S_T が極端に小さな値の場合には, 破断は不安定現象によって生ずる最高荷重以前に生じ, 破面に多くの脆性破面をふくむ。母材と同等の一様伸びを示すような軟質度の場合には破断は最高荷重後に生じ, 破面に占める脆性破面の割合は通常溶接継手などの場合と大差ない。

この研究は溶接継手を製作する上での多くの問題点を示唆している。溶接金属として母材よりも低強度レベルのものを使用するいわゆる under-matching の原則に立っても継手の静的引張強度は母材と同等のものが得られることがわかった。とくに溶接金属の一部に低強度材料を用いる部分軟質継手は継手の強度および延性の両面からも有効な方法であるといえる。すなわち溶接割れ防止の見地からの低強度材料を用いる溶接施工法の可能性を示唆しているものである。しかし本研究は溶接継手の静的引張強度に限ってみた場合の結果であり, 実際に溶接構造物の施工にあたっては解決されなければならない問題も多い。

謝 辞

本実験の大部分は日本溶接協会鉄鋼部会, SJ 委員会の共同研究として行なわれたものであり, その結果を引用させて戴いたことに対し委員各位に厚くお礼申し上げます。また本研究にあたって有益なご討論をたまわった木原博教授ならびに SJ 委員会委員各位に対して深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば, 須清修造 他: HT 80 鋼への低強度用溶接材料の適用について, 溶誌, 講演概要, 第9集 (1971).
- 2) 佐藤邦彦, 豊田政男: 軟層をふくむ溶接継手の静的強度に関する寸法効果, 溶接学会誌, 37 (1968) 1214.
- 3) K. Satoh and M. Toyoda: Static Tensile Properties of Welded Joints Including Soft Interlayer, Trans. of J. W. S., 1 (1970), No. 1
- 4) K. Satoh and M. Toyoda: Static Strength of Welded Joints Including Soft Interlayer under Tension across a Weld Line, Trans. of J. W. S., 1 (1970), No. 2.
- 5) K. Satoh and M. Toyoda: Mechanical Behaviors of Welded Joints Including Soft Interlayer under Tension Parallel to a Weld Line, Trans. of J. W. S., 2 (1971), No. 1.
- 6) 佐藤邦彦, 豊田政男: 機械的性質の不連続部をふくむ材の静的引張強度に関する基礎的研究, 溶接学会誌 40 (1971), No. 9, 885.